

5. Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание кремнистых пружинных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 3. С. 50–52.
6. Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Исследование химического состава окарины пружинной стали 60С2 // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 2. – С. 75–76.
7. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА / М.В. Темлянцев, К.С. Слаженева, А.Ю. Дзюба, А.А. Уманский, Н.В. Темлянцев // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – Вып. 33. – С. 55–63.
8. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
9. Нагрев стальных слябов / В.Н. Перетяtko, Н.В. Темлянцев, М.В. Темлянцев, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.
10. Филиппова М.В., Перетяtko В.Н., Темлянцев М.В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением. – Новосибирск: СО РАН, 2016. – 269 с.

УДК 662.957.8

Н. Б. Лошкарев, А. Х. Мухамадиева

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ТЕПЛООБМЕННЫЙ БЛОК С ПЛАВКИМ ЯДРОМ ДЛЯ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ ГОРЕЛКИ

Аннотация

Статья посвящена теплообменному блоку для регенеративных горелок. В данной статье приведен расчет массы плавкого ядра, размеров секции и времени перекидки регенеративного блока, состоящего из десяти секций с плавким ядром, температура плавления ядра которых, в соседних секциях отличается примерно на 100 °С. Это позволяет поддерживать постоянную температуру секции, удерживая эту температуру равной температуре плавления металла в данной секции, снимая с ее поверхности нагреваемым воздухом теплоту, или отдавая поверхности, теплоту продуктов сгорания, выделяющуюся при кристаллизации или поглощаемую при плавлении металлического ядра. Расчет обосновывает возможность снижения габаритов регенеративной насадки для горелки мощностью 200 кВт, и увеличение времени перекидки, при этом температура подогрева воздуха остается постоянной.

Ключевые слова: теплообменник, регенеративный теплообменник, регенеративная горелка, плавкое ядро, теплоемкость, теплота плавления.

Abstract

The article is devoted to the heat exchanger block for regenerative burners. In this paper, we calculate the mass of the fusible core, the dimensions of the section, and the time for the transfer of the regenerative block consisting of ten sections with a fusible core whose melting point in the neighboring sections differs by approximately 100 °C. This makes it possible to maintain the constant temperature of the section, keeping this temperature equal to the melting point of the metal in this section, removing heat from its surface by heating the air, or giving away the surfaces, the heat of the combustion products released during crystallization or absorbed during melting of the metal core. The calculation justifies the possibility of reducing the dimensions of the regenerative nozzle

for a 200 kW burner, and increasing the time for the overturn, while the air heating temperature remains constant.

Keywords: heat exchanger, regenerative heat exchanger, regenerative burner, fusible core, heat capacity, heat of fusion.

При эксплуатации промышленных печей важной задачей являются сокращение потерь энергии.

Рекуперативные и регенеративные горелки были разработаны с целью использования тепла дымовых газов для подогрева воздуха горения в непосредственной близости от агрегата, без потерь тепловой энергии при транспортировке горячих газов по трубопроводам [1].

Работниками ОАО «ВНИИМТ» разработан компактный регенеративный теплообменник большой теплоемкости, в которой используется скрытая теплота плавления металлического ядра, заключенного в теплопроводящую оболочку. В такой конструкции насадки регенератора с плавким ядром существенно увеличивается её возможность накапливать теплоту, т.е. повышается теплосодержание насадки при неизменной ее температуре, за счет скрытой теплоты плавления металлов.

Идея создания регенератора с плавки ядром для увеличения теплосодержания насадки, была выдвинута Ярошенко Ю.Г., Швыдким В.С., Гордоном Я.М. и Советкиным В.Л. [2] еще в 1988 году. Это техническое решение позволяет увеличить время перекидки или уменьшить размеры насадки регенератора, однако температура насадки, а значит и температура подогрева воздуха, в этом случае изменяется в достаточно широких пределах, что негативно сказывается на тепловом режиме работы агрегатов, оборудованных подобными регенераторами.

В регенеративной горелке с насадкой, содержащей плавкое ядро, предполагается установить четное количество регенеративных блоков. Каждый блок состоит из десяти последовательно установленных секций, температура плавления ядра которых отличается в соседних секциях приблизительно на 100 °С.

В качестве плавкого ядра могут быть использованы металлы и сплавы, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Свойства материалов для плавкого ядра регенеративной насадки

Металл или сплав	Температура плавления t , °С	Удельная теплота плавления λ , кДж/кг	Плотность ρ , кг/м ³
Легкоплавкий сплав (Bi 16 %, Pb 36 %, Sn 48 %)	155	45,73	8500
Олово	231,9	59	6834
Свинец	327,5	24,3	10510
Цинк	419,5	112,2	7135
Силумин АК 12 (Литейный сплав алюминия с кремнием)	550	364,36	2650
Алюминий	660	393	2380
АСМ (Алюминиевый антифрикционный сплав)	750	382,84	2830
МЛ 11 (Магниевый литейный сплав)	843	350,22	1800
Бронза БрБ2	955	209,44	8920
Медь	1083	213	8930

Секция регенератора с плавким ядром состоит из оболочек, заполненных металлом. Оболочка должна иметь развитую наружную поверхность. Это необходимо для создания

теплового потока, который обеспечит охлаждение продуктов сгорания на 100 °С за время прохождения их через секцию, в количестве, которое образуется при сжигании газа в горелке, работающей при номинальной мощности.

Масса плавкого ядра каждой секции может быть определена из ее теплового баланса. Количество теплоты, требуемое на расплавление ядра секции должно быть больше количества теплоты, требуемого на нагрев воздуха или охлаждение продуктов сгорания. Это обеспечивает увеличение времени перекидок, при котором ядро секции всегда будет оставаться в состоянии плавления или кристаллизации.

В качестве примера была рассмотрена горелка мощностью 200 кВт с расходом природного газа 20 м³/ч. При этом расход воздуха, теоретически необходимый для сжигания природного газа с теплотой сгорания $Q_n^p = 33500$, составит $L_0 = 9,2$. Таблица 15 [3], а при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$ потребуется $L_\alpha = 9,2 \cdot 1,1 = 10,12$ м³/м³. Таким образом, общий расход воздуха для сжигания 20 м³/ч природного газа составит $V_v = 20 \cdot 10,12 = 202,4$ м³/ч (или 0,0562 м³/с).

Расход продуктов сгорания при $\alpha = 1$ $V_0 = 10,2$ м³/м³, а при $\alpha = 1,1$ $V_\alpha = 10,2 + (\alpha - 1) \cdot L_\alpha = 10,2 + (1,1 - 1) \cdot 10,12 = 11,2$ м³/м³.

Примем температуру продуктов сгорания, выходящих из рабочего пространства нагревательной печи – $t_c = 1300$ °С, а температуру воздуха на входе в регенератор $t'_e = 20$ °С.

В настоящий момент наиболее рациональным конструктивным решением представляется использование секции в виде шахматного пучка трубок из нержавеющей стали с наружным диаметром $d_n = 5$ мм и внутренним – $d_v = 4$ мм.

Расстояние между наружными поверхностями рядом стоящих трубок – 1,5 мм. Ширину и высоту секции примем одинаковыми – 150 мм. Это предварительные размеры секции, которые в результате расчетов могут быть скорректированы.

Целью расчета является определение размеров каждой секции, которые обеспечили бы заданные изменения температуры дыма и воздуха. Так как одновременно на подачу воздуха будут работать 2 блока, то через каждый блок расход воздуха составит $202,4/2 = 101,2$ м³/ч или $V_{v1} = 101,2/3600 = 0,0281$ м³/с.

Для подогрева 101,2 м³/ч воздуха на 100 °С за время его прохождения через одну секцию, потребуется тепловой поток, который можно определить по уравнению:

$$q = V'_{v1} \cdot c_v \cdot \Delta t_{v1}, \quad (1)$$

где c_v – средняя теплоемкость воздуха в интервале изменения температуры его в секции, Дж/(м³ К);

Δt_{v1} – изменение температуры воздуха в первой по ходу его движения секции, °С;

$c_v = 1290$ – теплоемкость воздуха при средней его температуре в первой секции, Дж/(м³ К).

$$q = 0,0281 \cdot 1290 \cdot 100 = 3624,9 \text{ Вт.}$$

С другой стороны, тепловую мощность, передаваемую поверхностью секции воздуху, можно определить по уравнению теплообмена:

$$q = \alpha (\bar{t}_n - \bar{t}_e) \cdot f, \text{ Вт,} \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от теплообменной поверхности секции к воздуху, Вт/(м² К);

\bar{t}_n – средняя температура поверхности секции, °С;

\bar{t}_e – средняя температура воздуха в секции, °С;

f – площадь теплообменной поверхности секции, м².

Среднюю температуру поверхности секции t_n можно принять равной температуре плавления ядра, при этом теплота будет доставляться от расплавленного ядра к поверхности значительно быстрее, чем отдаваться поверхностью воздуху.

Коэффициент теплоотдачи для шахматного пучка труб можно определить по уравнению VII.19 [4]:

$$\alpha_g = (4,3 + 0,0038 \cdot \bar{t}_g) C \frac{w_g^{0,6}}{d_H^{0,4}} \cdot 1,163, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}, \quad (3)$$

где w_g – средняя скорость воздуха в свободном сечении секции (примем ее равной 6 м/с, исходя из условий минимизации гидравлического сопротивления);

\bar{t}_g – средняя температура воздуха в секции ($\bar{t}_g = \frac{20+120}{2} = 70$) °С;

C – коэффициент зависящий от соотношения расстояния между осями труб в ряду и их наружным диаметром, при $x/d_H = 1,2 \div 3,0$ $C = 1 + 0,1 \frac{x}{d_H}$, при $x/d_H < 3$ - $C = 1,333$.

$$\alpha = (4,3 + 0,0038 \cdot 70) 1,13 \cdot \frac{6^{0,6}}{0,005^{0,4}} \cdot 1,163 = 146,39 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$$

Расстояние между осями труб, при принятой компоновке, составляет $x = 6,5$ мм, а наружный диаметр трубки – $d_H = 5$ мм, таким образом $\frac{x}{d_H} = 6,5/5 = 1,3$, тогда $C = 1 + 0,1 \cdot 1,3 = 1,13$.

Приравняв уравнения 1 и 2, и учитывая при этом потери теплоты в окружающую среду через боковые стенки секции 2%, получим выражение:

$$1,02 \cdot V_g \cdot c_g \cdot \Delta t_g^1 = \alpha (\bar{t}_n - \bar{t}_g) f, \quad (4)$$

откуда можно найти площадь теплообменной поверхности, необходимой для нагрева воздуха на 100 °С, при данных условиях теплообмена. В расчетах приняты температура воздуха на входе – 20 °С, температура воздуха на выходе из секции – 120 °С для первой по ходу воздуха секции:

$$f = \frac{V_g \cdot c_g \cdot \Delta t_g}{\alpha (\bar{t}_n - \bar{t}_g)} = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1290 \cdot 100}{146,39 \cdot (155 - 70)} = 0,297 \text{ м}^2.$$

Поверхность одной трубки регенератора диаметром 5 мм и длиной 150 мм, составляет $f_l = d_H \cdot \pi \cdot l = 0,005 \cdot 3,14 \cdot 0,15 = 0,002356 \text{ м}^2$. Общее количество трубок в секции должно составлять $n = 0,297/0,002356 = 126$ шт.

Количество трубок, устанавливаемых в одном ряду – n_1 , определяется по формуле:

$$n_1 = \frac{V_g}{w_g \cdot c \cdot z} = \frac{0,0281}{6 \cdot 0,0015 \cdot 0,15} = 20,8 \text{ шт.} \quad (5)$$

Примем целое число трубок в первом ряду – $n_1 = 21$ шт.

Таким образом, в паре рядов располагаются 41 шт. трубок, а значит, нам необходимо расположить в секции $N = 126/41 = 3,07$ пары рядов трубок.

Общее количество рядов примем целое $N = 6$ рядов. Общая длина секции при этом составит 34 мм.

Тепловую мощность, которую получит воздух, проходя через секцию, определим по формуле (1):

$$q = V_g \cdot c_g \cdot \Delta t_g = 0,0281 \cdot 1290 \cdot 100 = 3625 \text{ Вт.}$$

В 126 трубках можно поместить плавкое ядро массой $M = 126 \cdot 0,0042 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 8500 = 2,018 \text{ кг}$. На плавление такого количества плавкого ядра затрачивается количество теплоты $Q = 45,73 \cdot 2,018 = 92,27 \text{ кДж}$, или 92270 Дж.

Время плавления ядра, т.е. время перекидки составит: $\tau = Q/q = 92270/3625 = 25,45 \text{ с}$.

Минимальное время перекидки получилось на третьей секции $\tau_3 = 24,7 \text{ с}$. Приняв это время перекидки, приходим к варианту работы блока регенератора, когда не во всех секциях плавкая насадка будет плавиться полностью, часть ее будет оставаться кристаллической. При этом и кристаллизироваться будет не все плавкое ядро. Это обеспечит высокие коэффициенты теплообмена на стороне расплавленного металла во все периоды работы регенератора.

Результаты расчетов были проверены путем компьютерного моделирования процессов нагрева и охлаждения теплообменных блоков с плавким ядром. Расчет проводился в про-

грамме SolidWorks Flow Simulation. Целью моделирования было соотнесение расчетов с ранее полученными результатами и подтверждение их достоверности.

Нагрев каждой секции регенеративного блока был смоделирован в SW Flow Simulation, в каждой секции наблюдалось плавление ядра, а при моделировании процесса прохождения холодного воздуха через нагретую секцию, воздух прогревался до значений, близких к температурам плавления ядер (рис. 1).

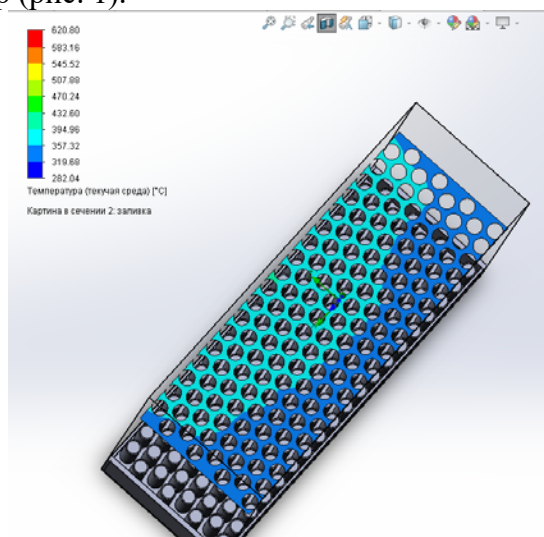


Рис. 1. Температурное поле воздуха, проходящего через нагретую насадку (материал плавкого ядра – Zn)

Для расчета процесса нагрева секции продуктами сгорания в программе SW Flow Simulation задается температура и скорость ПС на входе в секцию и их скорость на выходе. Так же задавался объемный расход ПС. При расчете процесса охлаждения секции воздухом, идущим на горение, в программе также задается температура и скорость воздуха на входе и выходе в секцию. Кроме того, задавалась тепловая мощность, передаваемая поверхностью секции воздуху. На изображении можно увидеть, что в процессе нагрева секции продуктами сгорания, их температура уменьшается к концу секции, и, наоборот, при прохождении холодного воздуха через нагретую насадку, его температура приближается к температуре расплавленного ядра. На рис. 2 представлено изображение распределения температур внутри расплавленного ядра из цинка, при прохождении через секцию воздуха, идущего на горение.

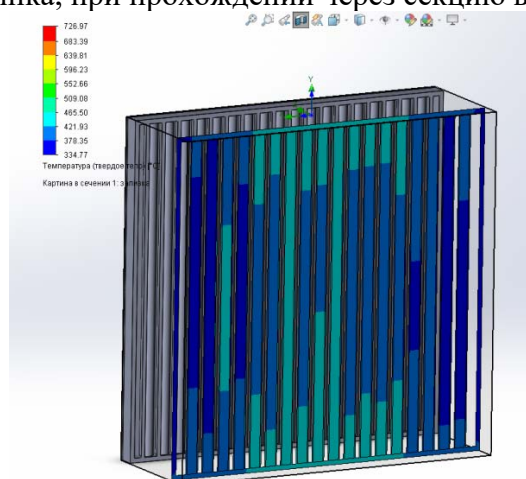


Рис. 2. Температурное поле расплавленного металла (Zn)

Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученные при теоретических расчетах результаты верны. Кроме того, при таком времени перекидки (24,7 с) ресурс работы клапанов увеличивается более чем в 2 раза, по сравнению с зарубежными аналогами, у которых время перекидки составляет 10 с.

Список использованных источников

1. Скоростная рекуперативная горелка ГСР-150 / Н.Б. Лошкарев, А.Х. Мухамадиева // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015) с международным участием, посвящённой 95-летию основания кафедры и университета (г. Екатеринбург, 26-27 марта 2015 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 96–100.
2. Регенеративный теплообменник. СССР №1 366 791. Гордон Я.М., Швыдкий В.С., Советкин В.Л., Ярошенко Ю.Г. Оpubл. в Б.И. 1988, №2.
3. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д., Китаев Б.И., Лисиенко В.Г., Телегин А.С., Ярошенко Ю.Г. учебное пособие для студентов вузов. Изд. 2-е. – М.: Металлург, 1982. 360 с.
4. Расчеты нагревательных печей / Э.М. Гольдфарб, А.Ф. Кравцов, Радченко [и др.]; под ред. Н.Ю. Тайца. – Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1958. – 420 с.

УДК 536.4;66.045.12

Ю. А. Марчкова, В. А. Микула

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА ДЛЯ ПГУ-ВГЦ

Аннотация

Проведен тепловой расчет тепловой схемы гибридной ПГУ-ВЦГ мощностью 500 МВт с помощью программы ThermoFlex. Было выполнено четыре варианта расчета конвективного газоохладителя с мембранными трубными спиралями. Найдена оптимальная конструкция конвективного газоохладителя.

Ключевые слова. ПГУ-ВГЦ, конвективный газоохладитель, газоохладитель со спиральными нагревательными поверхностями, ThermoFlex.

Abstract

Held thermal calculation of the thermal scheme of the hybrid CCGT IGCC 500 MW with the help of a program ThermoFlex. Was performed four options of calculating the convective gas cooler membrane of tubular spirals. Optimal design of convective gas cooler.

Keywords. IGCC, convective gas cooler, gas cooler with a spiral heating surfaces, ThermoFlex.

Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией твердого топлива (ПГУ-ВЦГ) являются перспективным путем производства энергии. Для повышения эффективности ПГУ-ВЦГ используют газоохладитель (ГО), в котором горячий синтез-газ после газогенератора отдает свою теплоту воде и пару [1].

Для разработки конвективного газоохладителя для ПГУ-ВЦГ мощностью 500 МВт был произведен тепловой расчет системы охлаждения синтез-газа.

Основные исходные данные для конструктивного теплового расчета газоохладителя были приняты по результатам расчета тепловой схемы гибридной ПГУ-ВЦГ 500 МВт (выполненного в программе ThermoFlex) и приведены в таблице 1.

Основными компонентами синтез-газа являются CO, H₂, N₂, поэтому для упрощения алгоритма определения теплофизических параметров газа расчетный состав принят трехком-